

PENGARUH PENAMBAHAN VARIABEL MOLARITAS NaOH SEBESAR 10 MOLAR PADA KONDISI SS/SH 1.0 DAN 3.0 TERHADAP KUAT TEKAN MORTAR *GEOPOLYMER* BERBAHAN DASAR *FLY ASH*

Carolina Yudi Hardika

Progam Studi S1 Teknik Sipil, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

carolinayh256gmail.com

Arie Wardhono

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

ariewardhono@unesa.ac.id

Abstrak

Sejauh ini kita kenal beton sebagai material bangunan paling populer, tersusun dari komposisi utama batuan (agregat), air, dan semen portland atau yang biasa kita sebut dengan beton konvensional. Namun, penggunaan semen ternyata memberikan pengaruh negatif terhadap lingkungan. Untuk mengatasi efek buruk yang merusak lingkungan dan memperbaiki problem durabilitas pada material beton yang menggunakan semen portland, maka diperlukan material lainnya sebagai pengganti semen portland untuk digunakan pada pembuatan beton. Joseph Davidovits menamakan temuannya *geopolymer* karena merupakan sintesa bahan-bahan alam nonorganik lewat proses polimerisasi. Bahan dasar utama yang diperlukan untuk pembuatan material *geopolymer* ini adalah bahan-bahan yang banyak mengandung unsur-unsur silika dan alumina. Unsur-unsur ini banyak didapati, di antaranya pada material hasil sampingan industri, seperti misalnya *fly ash* dari sisa pembakaran batu bara. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan informasi hasil kuat tekan mortar *geopolymer* berbahan dasar abu terbang dan NaOH 10 molar pada kondisi ss/sh 1.0 dan 3.0 dan untuk mendapatkan standar optimum penambahan *fly ash* pada pembuatan mortar tanpa semen menggunakan NaOH 10 molar pada kondisi ss/sh 1.0 dan 3.0 dengan menggunakan nilai w/s sebesar 0,2; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar solid larutan aktivator (w/s) dapat mempengaruhi kuat tekan mortar *geopolymer*. Hasil kuat tekan mortar kondisi SS/SH = 1 meningkat dari nilai variasi w/s = 0,20 hingga mencapai puncaknya pada nilai variasi w/s = 0,30 mampu mencapai nilai 61.05 MPa, sedangkan mortar kondisi SS/SH = 3 menunjukan kenaikan yang sama hingga mencapai puncaknya pada nilai variasi w/s = 0,30 dengan nilai kuat tekan 55.37 MPa. Setelah nilai w/s telah lebih dari 0,30, maka kuat tekannya menurun. Maka diperoleh bahwa kadar solid larutan aktivator (w/s) yang optimum pada kondisi SS/SH = 1 dan 3 adalah 0,30.

Kata kunci : Mortar *Geopolymer*, *Fly Ash*, Rasio W/S, Molaritas, SS/SH, Kuat Tekan, Suhu Ruangan

Abstract

So far we know concrete as the most popular building material, composed of the main composition of rock (aggregate), water, and portland cement or what we commonly call conventional concrete. However, the use of cement turned out to have a negative effect on the environment. To overcome the adverse effects that damage the environment and improve the problem of durability in concrete materials using portland cement, other materials are needed as a substitute for portland cement for use in making concrete. Joseph Davidovits named his findings *Geopolymer* because it is a synthesis of non-organic natural materials through the polymerization process. The main basic material needed for the manufacture of *geopolymer* material is materials that contain a lot of silica and alumina elements. Many of these elements are found, including in industrial by-products, such as *fly ash* from residual coal combustion. This study aims to obtain information on the results of *geopolymer* mortar compressive strength based on *Fly ash* and 10 molar NaOH in the conditions of ss / sh 1.0 and 3.0 and to obtain the optimum standard for *fly ash* addition in making mortar without cement using 10 molar NaOH in the condition ss / sh 1.0 and 3.0 using a value of w / s of 0.2; 0.25; 0.30; 0.35; 0.40; 0.45. The results showed that the solid content of the activator solution (w / s) can affect the *Geopolymer* mortar compressive strength. The results of the mortar compressive strength condition SS / SH = 1 increased from the variation value w / s = 0.20 to reach its peak in the variation value w / s = 0.30 able to reach the value of 61.05 MPa, while the mortar condition SS / SH = 3 showed an increase the same until it reaches its peak in the variation value w / s = 0.30 with a compressive strength of 55.37 MPa. After the value of w / s has more than 0.30, the compressive strength decreases. Then it was obtained that the optimum level of activator solution (w / s) which was optimum in SS / SH = 1 and 3 conditions was 0.30.

Keywords : *Geopolymer Mortar*, *Fly Ash*, Water Solid Ratio (w/s ratio), Molarity, Sodium Silicate to Sodium Hydroxide Ratio (SS/SH ratio), Compressive Strength, Room Temperature.

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Sejauh ini kita kenal beton sebagai material bangunan paling populer, tersusun dari komposisi utama batuan (agregat), air, dan Semen Portland atau yang biasa kita sebut dengan beton konvensional. Beton menjadi material yang sangat penting dan banyak digunakan untuk membangun berbagai infrastruktur seperti gedung, jembatan, jalan raya, dibawah tanah seperti pondasi. Bahan pembuatan beton sangat mudah didapati secara lokal, harganya materialnya juga relatif murah, serta teknologi pembuatannya pun relatif sederhana. Namun, penggunaan semen ternyata memberikan pengaruh negatif terhadap lingkungan (Sumajouw, dkk, 2014).

Untuk mengatasi efek buruk yang merusak lingkungan dan memperbaiki problem durabilitas pada material beton yang menggunakan Semen Portland, maka diperlukan material lainnya sebagai pengganti Semen Portland untuk digunakan pada pembuatan beton. Joseph Davidovits menamakan temuannya *Geopolymer* karena merupakan sintesa bahan-bahan alam nonorganik lewat proses polimerisasi. Bahan dasar utama yang diperlukan untuk pembuatan material *geopolymer* ini adalah bahan-bahan yang banyak mengandung unsur-unsur silika dan alumina. Unsur-unsur ini banyak didapati, di antaranya pada material hasil sampingan industri, seperti misalnya *fly ash* dari sisa pembakaran batu bara (Manuabe, dkk, 2014).

Pembuatan beton yang ramah lingkungan ini banyak mendapat perhatian dari kelompok peneliti dan pencinta lingkungan, mengingat bahan pengikat beton adalah semen yang mana dalam proses produksinya banyak melepaskan gas CO₂ ke atmosfer sehingga dapat menimbulkan efek rumah kaca, selain itu juga terjadinya pengrusakan lingkungan akibat pemakaian bahan dasar alam yaitu batu kapur. Oleh karena itu sekarang ini sedang mulai dikembangkan bahan pengikat beton lainnya sebagai pengganti semen yang diperkenalkan dengan nama *geopolymer*. Teknologi pembuatan material *geopolymer* dan aplikasinya telah banyak berkembang di beberapa negara Eropa, Amerika, Australia bahkan di Cina (Kushartomo, 2010).

Bahan *geopolymer* ialah suatu bahan inorganik yang terdiri dari Silikat (Si) dan aluminium (Al) sebagai material utama serta reaktan Alkaline untuk pengikat. Untuk membuat suatu kristal *geopolymer* dibutuhkan reaksi polimerisasi, yaitu reaksi pelepasan molekul kecil seperti H₂O untuk membentuk ikatan rantai monomer yang lebih panjang. Untuk

mendapatkan reaksi polimerisasi dibutuhkan suatu reaktan dari golongan alkalin yang dapat melepas ion-ion yang tidak diperlukan. Dalam hal ini digunakan sodium hidroksida (NaOH) yang memiliki sifat basa kuat sebagai reaktan alkalin dan dikombinasikan dengan sodium silikat dan sodium hidroksida sebagai katalisator untuk mempercepat reaksi polimerisasi. *geopolymer* mulai diteliti dan diminati oleh banyak negara karena proses pembuatannya memerlukan temperatur yang rendah, ramah lingkungan dan manfaatnya yang besar di berbagai bidang industri material antara lain sebagai binder, semen, keramik, campuran beton, isolator dan sebagainya. Material *geopolymer* merupakan polimer anorganik dengan penyusun utamanya silika dan alumina memakai bahan dasar aluminosilikat-hidroksida, oleh karena itu penting sekali untuk mengembangkan teknologi aplikasi material *geopolymer* dalam bidang teknologi beton di Indonesia mengingat kegunaannya yang sangat besar di bidang industri konstruksi (Ardi, 2013).

Fly ash adalah material yang sangat halus seperti debu, berasal dari sisa peleburan besi baja dan batu bara. *Fly ash* termasuk material pozzolan karena mengandung silika (SiO₂), besi oksida (Fe₂O₃), aluminium oksida (Al₂O₃), kalsium oksida (CaO), magnesium oksida (MgO) dan sulfat (SO₄). Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 18 tahun 1999 dan Peraturan Pemerintah Nomor 85 tahun 1999, *fly ash* diklasifikasikan sebagai limbah B-3 (Bahan Berbahaya dan Beracun), sehingga pemanfaatan abu terbang/*fly ash* adalah upaya untuk mengurangi volume, konsentrasi, toksisitas, dan tingkat bahaya limbah yang keluar ke lingkungan, dengan cara memanfaatkan melalui cara-cara penggunaan kembali (*reuse*), daur ulang (*recycle*), serta *recovery*. Salah satu limbah adalah sebagai bahan tambah atau sebagai pengganti sebagian semen portland dalam campuran mortar.

Pemeriksaan yang dilakukan terhadap abu terbang dari PLTU Surabaya diperoleh kandungan silika oksidanya 56% dan aluminium oksida 30.3%, sehingga abu terbang dapat dipakai sebagai bahan pembuat material *geopolymer*. Beton *geopolymer* merupakan salah satu alternatif yang dianjurkan dalam pembuatan beton ramah lingkungan apa lagi dengan bahan dasar pembuatannya memakai abu terbang (Kushartomo, 2010).

Geopolymer dikatakan ramah lingkungan, karena selain dapat menggunakan bahan-bahan buangan industri, proses pembuatan beton *geopolymer* tidak terlalu memerlukan energi, seperti halnya proses pembuatan semen yang setidaknya memerlukan suhu

hingga 800 derajat Celsius. Dengan pemanasan lebih kurang 60 derajat Celsius selama satu hari penuh sudah dapat dihasilkan beton yang berkekuatan tinggi. Karenanya, pembuatan beton *geopolymer* mampu menurunkan emisi gas rumah kaca yang diakibatkan oleh proses produksi semen hingga tinggal 20% saja (Hardjito, 2002)

Sifat-sifat fisik beton *geopolymer* dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti jenis dan dosis aktivator, modulus aktivator, suhu perawatan, lama waktu perawatan, dan kadar air dalam larutan. Beton *geopolymer* dengan campuran abu terbang (*fly ash*) tidak memiliki kemampuan mengikat seperti semen, tetapi dengan kehadiran air dan ukuran partikelnya yang halus, oksida silika yang dikandung oleh abu terbang (*fly ash*) akan bereaksi secara kimia dan menghasilkan zat yang memiliki kemampuan mengikat (Hardjito dkk, 2005).

Komposisi aktivator dalam jumlah yang tepat menjadi salah satu parameter untuk menghasilkan beton *geopolymer* yang bermutu (Hardjito, 2005). Penggunaan NaOH sebagai aktivator pada mortar *geopolymer* berbahan dasar *fly ash* dapat menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi daripada menggunakan KOH (Davidovits, 2008). Kadar kepekatan alkali aktivator sangat berpengaruh terhadap hasil kekuatan mortar sendiri, sehingga ditambahkan variasi molaritas NaOH pada pembuatan mortar *geopolymer* berbahan dasar *fly ash* untuk mengetahui bagaimana pengaruh terhadap kuat tekan mortar, kuat lekat mortar sebagai spesi bata merah serta mendapatkan kadar optimum penambahan molaritas NaOH.

Hasil-hasil riset selama ini telah menunjukkan bahwa beton *geopolymer* memiliki sifat-sifat teknik yang amat mengesankan, di antaranya kekuatan dan keawetan yang tinggi. Sebuah perusahaan beton pracetak di Australia bahkan sudah mulai memproduksi prototipe beton *geopolymer* pracetak dalam bentuk bantalan rel kereta, pipa-pipa beton untuk saluran pembuangan air kotor, dan lain-lain. Hal yang memberikan perbedaan cukup penting antara beton *geopolymer* dengan beton polimer organik yang sudah lebih dulu diperkenalkan, terutama adalah biaya pembuatannya. Beton *geopolymer* bisa diproduksi dengan biaya yang setara dengan beton biasa, yang jauh lebih murah dibanding biaya untuk menghasilkan beton polimer organik (Hardjito, 2002)

Di dunia material konstruksi, hingga saat ini sangat perlu dilakukan penelitian lebih mendalam lagi mengenai pembuatan mortar *geopolymer* ini. Meskipun sudah banyak hasil riset para ahli yang menunjukkan bahwa jenis mortar ini memiliki mutu

yang baik. Dalam penelitian tugas akhir ini, digunakan Sodium Hidroksida dengan kadar 10 molar dengan tujuan sebagai pembanding antara penelitian ini dengan penelitian-penelitian sebelumnya, karena pada penelitian sebelumnya disebutkan bahwa menggunakan kadar NaOH sebesar 14 molar. Selain itu, perbandingan massa antara Sodium Silikat dan Sodium Hidroksida dibuat dengan variasi 1.0 dan 3.0, variasi kondisi perbandingan massa tersebut dipilih karena pada penelitian ini dilaksanakan secara berkelompok dan setiap mahasiswa menggunakan variasi kondisi Sodium Silikat dan Sodium Hidroksida yang berbeda-beda. Hal ini dimaksudkan agar dapat mengetahui komposisi yang lebih tepat dalam pembuatan mortar *geopolymer* yang nantinya diharapkan akan didapat hasil mortar dengan kekuatan optimum.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang sudah terpapar sebelumnya. Maka, rumusan masalah yang dapat diambil sebagai berikut :

1. Bagaimana hasil kuat tekan mortar *geopolymer* berbahan dasar abu terbang dan NaOH 10 molar dengan dipengaruhi kepekatan larutan aktivator pada kondisi ss/sh 1.0 dan 3.0?
2. Berapa standar optimum yang digunakan untuk penambahan *fly ash* pada pembuatan mortar tanpa semen menggunakan NaOH 10 molar pada kondisi ss/sh 1.0 dan 3.0?

KAJIAN PUSTAKA

A. Umum

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya bahwa faktor utama adanya penelitian mengenai *geopolymer* adalah emisi gas CO₂ dari industri semen, penggunaan semen, maupun pembuatan beton yang menggunakan semen sebagai bahan materialnya menjadi salah satu penyebab timbulnya efek rumah kaca yang berimbas pada peningkatan temperatur secara global yang kemudian berimbas pula terhadap perubahan iklim (Hardjito, 2004)

Berubahnya iklim ini selain disebabkan oleh pemanasan global, juga disebabkan oleh adanya global dimming digambarkan sebagai suatu keadaan dimana menurunnya jumlah sinar matahari yang mencapai bumi sebagai akibat polusi oleh partikel-partikel di udara yang menghalangi sinar matahari yang akan mencapai bumi. Dengan demikian diperlukan usaha untuk mengurangi polusi tersebut, sehingga global dimming pada khususnya dan pemanasan global pada umumnya bisa lebih di tekan (Fortune, 2005), diambil dari Hardjito (2005).

Produksi semen meningkat sekitar 3% setiap tahunnya (Mc. Caffrey, 2002), diambil dari Djwantoro Hardjito (2005). Dalam memproduksi 1 ton semen, dihasilkan pula 1 ton gas CO₂ yang dilepas ke atmosfer, seperti halnya pada proses dekarbonasi batu kapur dalam kiln selama proses produksi semen serta pada proses pembakaran bahan bakar fosil (Davidovits, 1994). Dengan demikian, besarnya kontribusi produksi semen bagi efek rumah kaca ditaksir sekitar 1.35 juta ton tiap tahunnya atau sekitar 7% dari total penyebab efek rumah kaca di seluruh dunia (Malhotra, 2002), diambil dari Djwantoro Hardjito, 2005.

Berangkat dari hal itulah diperlukan suatu produksi beton yang ramah terhadap lingkungan. Mc. Caffrey (2002), diambil dari Djwantoro Hardjito 2005 mengatakan bahwa emisi gas CO₂ yang dihasilkan oleh industri semen bisa ditekan dengan menurunkan jumlah kapur dalam semen, menurunkan kadar semen dalam beton serta dengan cara mengurangi pembangunan gedung yang menggunakan semen. Hal senada diungkapkan Mehta (2002), diambil dari Djwantoro Hardjito (2005). Ia menyaranakan dua hal, yakni dengan mencoba menggunakan beberapa sumber daya alam yang rendah energi dan usaha meminimalisasi emisi gas CO₂ yang merupakan tujuan jangka pendek atau yang lebih terkenal dengan sebutan *industrial ecology*. Sedangkan untuk tujuan jangka panjang, disarankan untuk mengurangi limbah industri yang tidak diinginkan dengan jalan memanfaatkannya.

B. Mortar Geopolymer

1. Mortar

Menurut SNI 03-6825-2002 mortar didefinisikan sebagai campuran material yang terdiri dari agregat halus (pasir), bahan perekat (tanah liat, kapur, semen portland) dan air dengan komposisi tertentu. Bahan perekat yang dapat digunakan untuk membuat mortar dapat berupa tanah liat, kapur, semen portland, maupun *fly ash*/abu terbang.

Secara umum mortar dapat dibedakan menjadi 4 macam (Tjokrodinuljo, 1996), yaitu :

- Mortar lumpur : yaitu mortar yang dibuat dari campuran pasir, tanah liat/lumpur, dan air.
- Mortar kapur : yaitu mortar yang dibuat dari campuran pasir, kapur, dan air.
- Mortar semen : yaitu mortar yang dibuat dari campuran pasir, semen portland, dan air dengan menggunakan perbandingan yang tepat
- Mortar khusus : yaitu mortar yang dibuat dengan menambahkan bahan khusus ke dalam

mortar (b) dan (c) diatas dengan tujuan tertentu.

Persyaratan spesifikasi sifat mortar yang disiapkan di laboratorium harus terdiri dari suatu bahan pengikat bersifat semen, agregat dan air seluruhnya harus memenuhi persyaratan bahan. Menurut ASTM C270 standar mortar berdasarkan kekuatannya dibedakan sebagai berikut:

a. Mortar tipe M

Mortar tipe M adalah adukan dengan kuat tekan yang tinggi. Kuat tekan minimumnya 175 kg/cm².

b. Mortar tipe N

Mortar tipe N adalah adukan kuat tekan sedang. kuat tekan minimumnya adalah 124 kg/cm².

c. Mortar tipe S

Mortar tipe S adalah adukan dengan kuat tekan sedang. Kuat tekan minimumnya adalah 52,5 kg/cm².

d. Mortar tipe O

Mortar tipe O adalah adukan dengan kuat tekan rendah. Kuat tekan minimumnya adalah 24,5 kg/cm².

e. Mortar tipe K

Mortar tipe K adalah adukan dengan kuat tekan rendah. Kuat tekan minimumnya adalah 5,25 kg/cm².

2. Geopolymer

Geopolymer adalah material baru tahan api dan panas, pelapis dan perekat, aplikasi obat, keramik suhu tinggi, pengikat baru untuk komposit serat tahan api, beracun dan radioaktif enkapsulasi limbah, dan semen baru untuk beton. Sifat dan penggunaan *geopolymer* banyak dieksplorasi dalam studi ilmiah dan industri berbagai disiplin ilmu: kimia modern anorganik, kimia fisik, koloid kimia, mineralogi, geologi, dan jenis lain dari teknologi proses rekayasa. *geopolymer* merupakan bagian dari ilmu polimer, kimia dan teknologi yang membentuk salah satu bidang utama ilmu material. Polimer yang baik bahan organik, berbasis karbon yaitu, atau polimer anorganik, misalnya silikon berbasis. Para polimer organik terdiri dari kelas polimer alam (karet, selulosa), polimer organik sintetis (serat tekstil, plastik, film, elastomer, dll) dan biopolimer alam (biologi, kedokteran, farmasi). Bahan baku yang digunakan dalam sintesis polimer berbasis silikon terutama mineral pembentuk batuan asal geologi, maka nama:..

Geopolymer Joseph Davidovits menciptakan istilah pada tahun 1978 (sumber: wikipedia).

Beton *geopolymer* merupakan beton geosintetik yang reaksi pengikatannya terjadi melalui reaksi polimerisasi dan bukan melalui reaksi hidrasi seperti pada beton konvensional (Davidovits, 2005).

Geopolymer dikatakan ramah lingkungan, karena selain dapat menggunakan bahan-bahan buangan industri, proses pembuatan beton *geopolymer* tidak terlalu memerlukan energi, seperti halnya proses pembuatan semen yang setidaknya memerlukan suhu hingga 800 derajat Celsius. Dengan pemanasan lebih kurang 60 derajat Celsius selama satu hari penuh sudah dapat dihasilkan beton yang berkekuatan tinggi. Karenanya, pembuatan beton *geopolymer* mampu menurunkan emisi gas rumah kaca yang diakibatkan oleh proses produksi semen hingga tinggal 20 persen saja (Hardjito, 2002).

3. Beton Geopolymer

Beton *Geopolymer* merupakan beton yang ramah terhadap lingkungan. Hal ini dikarenakan beton *geopolymer* merupakan beton yang dalam pembuatannya sama sekali tidak menggunakan semen, tetapi menggunakan bahan-bahan sisa dari alam yang mempunyai kadar silika alumina tinggi. Hal ini bertujuan agar bahan dasar tersebut bisa bereaksi membentuk polimerisasi dengan aktivatornya. Dengan demikian, pada dasarnya penggunaan beton *geopolymer* tidak hanya mengurangi emisi gas CO₂ yang dihasilkan oleh industri semen, tetapi juga bisa memanfaatkan material sisa (limbah) yang tidak termanfaatkan seperti *fly ash* (Hardjito, 2004).

C. Penelitian-Penelitian Terdahulu

1. Material Dasar

- Davidovits (1999), diambil dari Djwantoro Hardjito (2005)
Davidovits mengkalsinasi kaolin (tanah liat) selama 6 jam pada temperatur 750 derajat Celsius. Beliau menyebut metakaolin ini sebagai kandoxi (kaolinite, nacrite, dickite oxide) dan menggunakannya untuk membuat *geopolymer*. Untuk pembuatan beton *geopolymer* sendiri, beliau menyarankan rasio massa antara Si dengan Al sekitar 2.0.
- Barbosa et al (2000), diambil dari Dwantoro Hardjito (2005)
Beliau berpendapat bahwa material-material yang dikalsinasi seperti *fly ash*, slag, dan kalsinasi kaolin menunjukkan kuat tekan yang

lebih tinggi daripada material yang tidak dikalsinasi seperti tanah liat, mineral-mineral yang terjadi secara alamiah, serta barang tamban.

- Xu dan Van Deventer (2002)
Keduanya menyatakan bahwa dengan mengkombinasikan material yang terkalsinasi seperti *fly ash* dengan material non-kalsinasi seperti kaolinit atau tanah liat (kaolin) dan albite menghasilkan peningkatan kuat tekan yang signifikan serta mampu mengurangi waktu reaksi.
- Fernandes-Jimnez dan Paomo (2003), diambil dari Djwantoro Hardjito (2005)
Mereka menyatakan bahwa untuk mendapatkan binder yang menghasilkan kuat tekan optimum sebaiknya menggunakan *fly ash* jenis *low calcium* dengan kadar kurang dari 5%, Fe₂O₃ tidak lebih dari 10%, rendah CaO, Kadar silika pun sebaiknya berada antara 40%-45% serta 80%-90%, ukuran partikel sebaiknya lebih kecil dari 45 micrometer.
- Van Jaarsveld et al (2003), diambil dari Djwantoro Hardjito (2005)
Beliau menemukan bahwa *fly ash* dengan kadar kalsium oksida (CaO) yang lebih tinggi mampu menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi. Hal ini dikarenakan susunan Calcium-Aluminat-Hidrate dan gabungan kalsium lainnya. Karakteristik lainnya yang mempengaruhi kecocokan *fly ash* yang berkadar CaO tinggi sebagai material *geopolymer* adalah ukuran partikelnya, bersifat amorf dari kadar kemurnian *fly ash* itu sendiri.

2. Hasil Dan Proporsional Campuran

- Palomo et al (1999), diambil dari Djwantoro Hardjito (2005)
Pada tahun tersebut beliau melakukan suatu studi terhadap *geopolymerisasi* dari *fly ash low calcium* dengan ketentuan sebagai berikut :
 - Perbandingan massa Si dengan Al sebesar 1.8 liter.
 - Menggunakan 4 komposisi yang berbeda dengan perbandingan massa antara alkalin dengan *Fly ash* dengan rentan 0.25 sampai dengan 0.3.
 - Selain itu digunakan pula perbandingan massa SiO₂/K₂O atau SiO₂/Na₂O sebesar 0.63 sampai dengan 1.23.
 - Dimensi binder yang digunakan adalah 10x10x10 mm.Berdasarkan hasil uji kuat tekan di dapat nilai kuat tekan maksimum sebesar 60 MPa dengan

menggunakan sodium silikat dan sodium hidroksida setelah binder di curing selama 24 jam pada temperatur 65 derajat celcius. Dari penelitian itu juga didapat kesimpulan bahwa semakin tinggi *curing time* yang dilakukan, diikuti dengan semakin tingginya kuat tekan yang dihasilkan.

b. Xu dan Van Deventer (2000), diambil dari Djwantoro Hardjito (2005)

Mereka menyatakan bahwa perbandingan massa antara alkalin silikat dengan alkalin alumina sebaiknya mendekati 0.33. Hal ini untuk memberi kesempatan akan terjadinya reaksi polimerisasi. Dimensi binder yang digunakan pada waktu itu 20x20x20 mm dengan kuat tekan maksimum dicapai pada 19 Mpa setelah dilakukan curing selama 72 jam yang berada pada temperatur 35 derajat celcius.

c. Van Jaarsveld (1998), diambil dari Djwantoro Hardjito (2005)

Beliau melakukan penelitian dengan menggunakan perbandingan massa antara alkalin dengan *fly ash* sekitar 0.39. Komposisi selengkapannya adalah 57% *fly ash* dicampur dengan 15% kaolin. Sedangkan komposisi larutan alkalin terdiri atas 3.5% sodium silikat, 20% air dan 4% terdiri atas sodium atau potassium hidroksida. Dengan komposisi demikian kuat tekan optimum yang mampu dicapai binder buatannya sebesar 75 Mpa ketika *fly ash* digunakan sebagai material dasarnya.

d. Barbosa et al (2000), diambil dari Djwantoro Hardjito (2005)

Berawal dari penelitian yang telah dilakukan Davidoits pada tahun 1982 yang menggunakan kalsinasi kaolin sebagai bahan dasar, Ia mencoba membuat 7 komposisi campuran pasta *Geopolymer* dengan perbandingan massa oksida sebesar $0.2 < \text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 < 0.48$; $3.3 < \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 4.5$; $10 < \text{H}_2\text{O}/\text{NaO} < 25$. Kesimpulan yang dapat diambil bahwa komposisi optimum terjadi pada perbandingan antara Na_2O dengan SiO_2 sebesar 0.25, rasio H_2O dengan Na_2O sebesar 10 dan rasio antara SiO_2 dengan Al_2O_3 sebesar 3.3. Selain itu, komposisi dengan kadar air tinggi sebesar 25% menyebabkan perkembangan kuat tekan binder menjadi lambat.

e. Djwantoro Hardjito dan B. V. Rangan (2004)

Penelitian yang dilakukan pada tahun 2004 ini menggunakan ketentuan sebagai berikut :

- 1) Jenis *fly ash* yang digunakan adalah jenis *fly ash low calcium* atau *fly ash F*.
- 2) Jenis aktivator yang digunakan adalah sodium silikat dan sebagai larutan alkalinnya digunakan sodium hidroksida, dimana konsentrasi sodium hidroksida (NaOH) sebesar 8 dan 14 M.
- 3) Perbandingan massa antara sodium silikat dengan sodium hidroksida sebesar 0.4 dan 2.5.
- 4) Untuk sodium hidroksida dengan kadar 8 M, dilakukan *curing time* selama 24 jam serta *curing temperature* sebesar 60 derajat celcius.
- 5) Sedangkan untuk sodium hidroksida dengan konsentrasi 14 M dilakukan *curing time* selama 24 jam dan *curing temperature* pada suhu 30 derajat celcius, 45 derajat celcius, 75 derajat celcius, dan 90 derajat celcius.

Dari penelitian yang beliau lakukan, dapat diambil kesimpulan bahwa kuat tekan maksimum yang dapat dicapai binder sekitar 65 Mpa. Selain itu, semakin lama *curing time* yang dilakukan, semakin tinggi kuat tekannya. Begitu juga dengan curing temperaturnya. Hal ini berbanding terbalik dengan kadar air. Semakin tinggi kadar airnya, semakin rendah kuat tekannya. Serta dengan penambahan *superplasticiser*, tidak mengakibatkan penambahan kuat tekan yang signifikan.

D. FlyAsh

Fly ash adalah bagian dari sisa abu pembakaran yang berupa bubuk halus dan ringan yang diambil dari campuran gas tungku pembakaran menggunakan bahan batubara pada boiler Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Sebagai bahan tambah beton, abu terbang (*fly ash*) dinilai dapat meningkatkan kualitas beton dalam hal kekuatan, kekedapan air, ketahanan terhadap sulfat dan kemudahan dalam pengerjaan (*workability*) beton (Hadi, 2000, dalam Andoyo, 2006).

Selain itu menurut ACI Committe 232-2004, *fly ash* juga dapat didefinisikan sebagai sisa serbuk halus yang merupakan hasil dari pembakaran tanah atau batubara yang dipindahkan oleh cerobong asap dari zona pembakaran menuju sistem pembersihan partikel (Hardjito, 2005).

Menurut Gourley (2003), bentuk *fly ash* berupa bulatan-bulatan yang lebih halus dibandingkan dengan semen portland terhadap serangan bahan kimia lainnya, juga dikarenakan kalsium dalam jumlah besar (*fly ash* kelas C) bisa mempengaruhi proses

polimerisasi serta bisa mengubah susunan mikrostruktur dari beton *geopolymer* itu sendiri (Hardjito, 2005).

1. Proses Pembentukan *Fly ash*

Sistem pembakaran batubara umumnya terbagi 2 yakni sistem unggun terfluidakan (*fluidized bed system*) dan unggun tetap (*fixed bed system* atau *grate system*). Disamping itu terdapat system ke-3 yakni *spouted bed system* atau yang dikenal dengan unggun pancar. *Fluidized bed system* adalah sistem dimana udara ditiup dari bawah, sehingga benda padat di atasnya berkelakuan mirip fluida. Teknik fluidisasi dalam pembakaran batubara adalah teknik yang paling efisien dalam menghasilkan energi. Pasir atau corundum yang berlaku sebagai medium pemanas dipanaskan terlebih dahulu. Pemanasan biasanya dilakukan dengan minyak bakar. Setelah temperatur pasir mencapai temperatur bakar batubara (300°C) maka diumpankanlah batubara. Sistem ini menghasilkan abu terbang dan abu yang turun di bawah alat. Abu-abu tersebut disebut dengan *fly ash* dan *bottom ash*. Teknologi *fluidized bed* biasanya digunakan di PLTU (Dacosta, 2009).

2. Kemampuan *Fly ash*

Fly ash batubara memiliki kemampuan dapat menyerap air dan beberapa unsur hara sehingga dapat meningkatkan kualitas adsorpsi dengan baik (geology.com.cn, dalam Rilham, 2012). Selain itu *fly ash* batubara juga dapat digunakan sebagai adsorben berbagai macam zat-zat polutan seperti SO_x, CO, dan partikulat debu termasuk timbal (Pb). *Fly ash* batubara juga digunakan dalam bahan cetakan pada industri pengecoran logam karena memiliki ukuran butir jauh lebih kecil daripada pasir cetak sehingga saat dibuat cetakan akan menghasilkan permukaan yang lebih halus (Prahasto dan Sugiyanto, 2007).

E. Agregat

Hampir tiga perempat volume beton ditempati oleh agregat, sehingga karakteristik agregat akan menentukan kualitas beton. Ditinjau dari aspek ekonomis, harga agregat dalam satuan berat yang sama jauh lebih murah dari pada semen. Agregat merupakan bahan yang bersifat kaku dan memiliki stabilitas volume dan durabilitas yang baik pada pasta semen. Untuk menghasilkan beton yang baik, agregat halus maupun agregat kasar harus memiliki gradasi atau komposisi ukuran yang proporsional (Hidayat, S., 2009).

F. Air Suling

Air suling adalah air yang berasal dari proses distilasi (penyulingan). Air suling dengan tingkat kemurnian tinggi (*ultrapure distilled water*) dapat diperoleh dengan melakukan penyulingan ulang air suling biasa. Kemudian air hasil penyulingan kedua kali tersebut dialirkan melalui sistem saringan dengan karbon aktif dan tabung deionisasi. Air suling dapat dimanfaatkan sebagai larutan elektrolit untuk mengisi tabung elektroliser. Larutan ini akan dicampur sodium bikarbonat (NaOH). Volume air suling yang digunakan tergantung pada volume tabung yang digunakan. Air mineral juga dapat digunakan sebagai pengganti air suling, namun hal ini akan membuat risiko rusaknya elektroda semakin tinggi. Hal ini disebabkan kandungan logam dan mineral dalam air mineral masih cukup tinggi (sumber : wikipedia).

G. Larutan Aktivator

Aktivator merupakan senyawa yang digunakan agar terjadi reaksi polimerisasi kondensasi pada mortar *geopolymer*. Hidroksida yang terdapat pada aktivator akan bereaksi dengan SiO₂ dan Al₂O₃ dan membentuk ikatan gugus banyak (polimer) dengan mengeluarkan H₂O sebagai sisa proses polimerisasi. NaOH dan KOH dapat digunakan sebagai aktivator pada campuran mortar *geopolymer*. Untuk dapat digunakan pada campuran mortar *geopolymer*, aktivator yang berupa padatan harus dilarutkan ke dalam air disesuaikan dengan molaritas larutan aktivator yang dikehendaki (Davidovits, 2008).

Menurut Davidovits, 1999; Palomo et al, 1999; Barbosa et al, 2000; Xu dan Van Deventer, 2002, kebanyakan larutan alkaline yang digunakan untuk pembuatan beton *geopolymer* adalah kombinasi dari sodium hidroksida (NaOH) atau potassium hidroksida (KOH) dengan sodium silikat dan potassium silikat (Djwantoro Hardjito, 2005).

1. Sodium Silikat

Sodium silikat adalah nama umum dari sodium metasilikat. Nama dagang yang biasanya dipakai untuk sodium silikat ini adalah *water glass* atau *liquid glass*. Sodium silikat tersedia di pasaran dalam bentuk cairan maupun dalam bentuk padatan. Beberapa contoh aplikasi penggunaan sodium silikat adalah industri pengolahan air, pemucat dan penyesuai ukuran pada tekstil dan industri kertas, pengelolah biji, memadatkan tanah, pembentuk gelas, pengeboran, pigmen, pengikat pada roda ampelas/abrasi, pengecoran logam dan cetakan, zat tahan air pada mortar dan semen, pelapis peralatan kimia, meningkatkan ketahanan

terhadap minyak, katalisator, bahan baku untuk silika gel, industri sabun dan deterjen, perekat (terutama untuk segel dan kertas laminating pada papan container), deflokuland pada industri keramik.

Tabel 1 Komposisi kimia larutan Na_2SiO_3

Oksida	%
SiO_2	29,4
Na_2O	14,7
Air (H_2O)	55,9

2. Sodium Hidroksida

Sodium hidroksida berfungsi untuk mereaksikan unsur-unsur Al dan Si yang terkandung dalam *fly ash* sehingga dapat menghasilkan ikatan polimer yang kuat. Campuran antara *fly ash* dan sodium hidroksida membentuk ikatan yang kurang kuat tetapi menghasilkan ikatan yang lebih padat dan tidak ada retakan seperti campuran sodium silikat dan *fly ash*.

Tabel 2 Variasi molar larutan NaOH

Molaritas	Padatan (gr)	Air (gr)	Padatan/ Larutan	Padatan/ Air
16	444	556	44%	80%
14	404	596	40%	68%
12	361	639	36%	56%
10	314	686	31%	46%
8	262	738	26%	36%

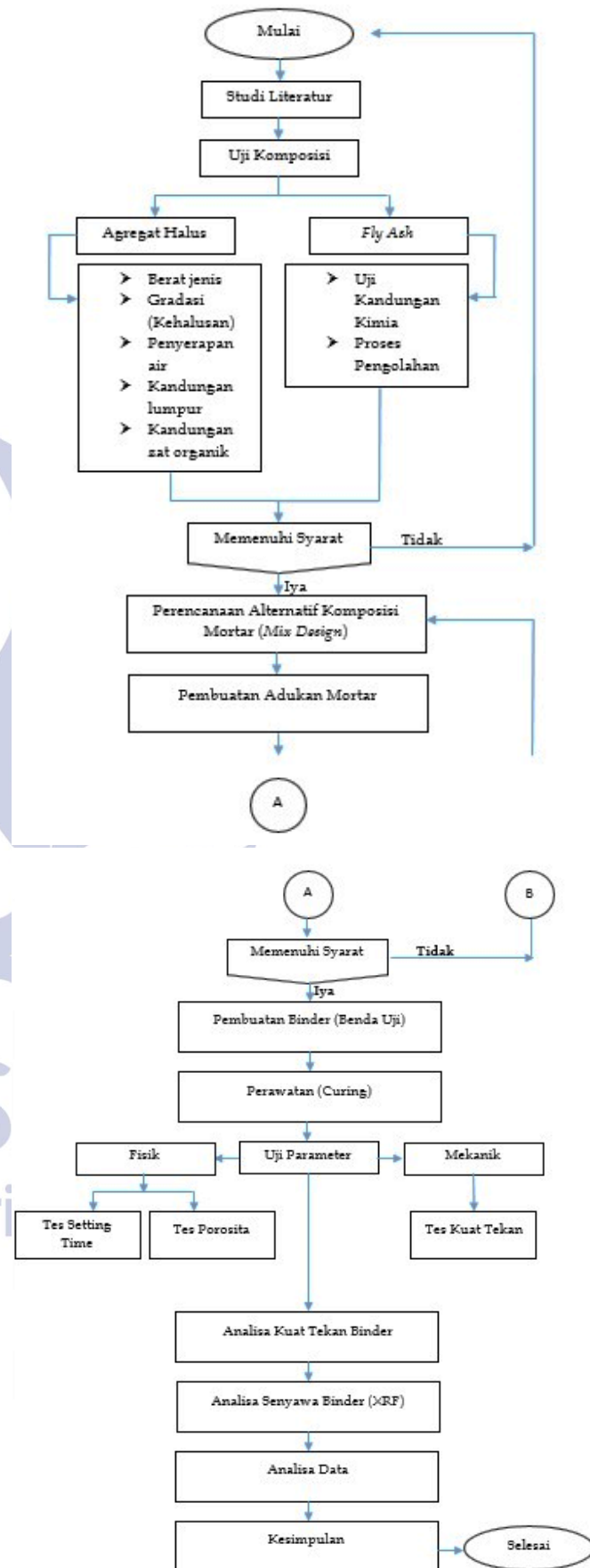
METODE

A. Jenis Penelitian

Pada penelitian kali ini akan dilakukan proses penelitian dengan metode eksperimen dengan cara melakukan uji laboratorium. Penelitian eksperimen dapat didefinisikan sebagai metode sistematis guna membangun hubungan yang mengandung fenomena sebab akibat. Penelitian eksperimen merupakan metode inti dari model penelitian yang menggunakan pendekatan kuantitatif. Pada pelaksanaan uji laboratorium akan dilakukan penambahan NaOH pada mortar *geopolymer* berbahan dasar abu terbang dengan molaritas yang telah ditentukan. Pada penelitian ini mortar yang dihasilkan memiliki mutu K225. Selain itu, mortar yang telah jadi nantinya akan diuji kuat tekannya.

B. Tempat dan Waktu Penelitian

Menurut SNI 03-6825-2002 mortar didefinisikan sebagai campuran material yang terdiri dari agregat halus (pasir), bahan perekat (tanah liat, kapur, semen portland) dan air dengan komposisi tertentu. Bahan perekat yang dapat digunakan untuk membuat mortar dapat berupa tanah liat, kapur, semen portland, maupun *fly ash*/abu terbang.



Gambar 1 Flowchart alur penelitian

C. Populasi dan Sampel

1. Populasi

Populasi adalah keseluruhan atau totalitas dari objek penelitian. Laurence L. Lapin (1980:10) mengatakan : “*Population is the collections of all observation of a specified charactersitics of interest*”. Artinya bahwa populasi merupakan kumulan dari sejumlah pengamatan atas suatu karakteristik yang ditetapkan. Selanjutnya John E. Freud (1981:34) mengatakan : “*Population is a set of data consist of all conceivably possible or hypothetically possible observation of certain phenomom*”. Artinya populasi adalah suatu bagian data yang berisi keseluruhan dari sesuatu yang mungkin atau hipotesis dugaan yang mungkin observasi dari suatu fenomena tertentu. Selanjutnya Zulfadrial (2004: 47) mengatakan bahwa : “Populasi adalah jumlah keseluruhan dari unit analisa yang ciri-cirinya akan diduga.”. Sedangkan menurut Sugiyono (2006: 117) menyebutkan bahwa” populasi adalah wilayah generalisasi yang terdiri atas : obyek/subyek, yang mempunyai kualitas dan karakteristik tertentu yang ditetapkan oleh peneliti untuk dipelajari dan kemudian ditarik kesimpulannya”. Berdasarkan definisi tersebut diatas dapat dikatakan bahwa populasi merupakan keseluruhan dari obyek/subyek yang dapat dijadikan sebagai sumber data dalam suatu penelitian, dan mempunyai karakteristik tertentu.

Populasi dalam penelitian ini adalah data hasil pengujian kubus mortar 5x5x5 cm berupa data kuat tekan mortar tanpa semen.

2. Sampel

Penelitian ini digunakan sampel dari semen populasi dikarenakan jumlah populasi bersifat data hasil pengujian di Laboratorium dengan sample benda uji berjumlah 126 buah dengan kubus 5x5x5 cm.

Menurut Sugiyono (2013:218-219) *purposive* sampling adalah teknik pengambilan sampel sumber data dengan pertimbangan tertentu. Pertimbangan tertentu ini, misalnya orang tersebut yang dianggap paling tahu tentang apa yang kita harapkan, atau mungkin dia sebagai penguasa sehingga akan memudahkan peneliti menjelajahi obyek atau situasi sosial yang diteliti.

Tabel 3 Rancangan Presentase Water Solid Ratio (W/S) dan abu terbang (*fly ash*) pada kondisi SS/SH = 1

Mix	w/s	Jml Mortar	Mix Design				
			PC	Pasir	FA	NaOH	Na ₂ SiO ₃
A	-	12	1	2.75	-		
B	0.20	12	0	2.75	1	0.163	0.163
C	0.25	12	0	2.75	1	0.208	0.208
D	0.30	12	0	2.75	1	0.259	0.259
E	0.35	12	0	2.75	1	0.313	0.313
F	0.40	12	0	2.75	1	0.372	0.372
G	0.45	12	0	2.75	1	0.436	0.436

Tabel 4 Rancangan Presentase Water Solid Ratio (W/S) dan abu terbang (*fly ash*) pada kondisi SS/SH = 3

Mix	w/s	Jml Mortar	Mix Design				
			PC	Pasir	FA	NaOH	Na ₂ SiO ₃
A	-	12	1	2.75	-		
B	0.20	12	0	2.75	1	0.087	0.261
C	0.25	12	0	2.75	1	0.113	0.339
D	0.30	12	0	2.75	1	0.143	0.429
E	0.35	12	0	2.75	1	0.172	0.516
F	0.40	12	0	2.75	1	0.209	0.627
G	0.45	12	0	2.75	1	0.247	0.741

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pemeriksaan Material Abu Terbang (*Fly ash*)

Fly ash yang digunakan pada penelitian ini menggunakan *fly ash* kelas C yang didapat dari CV. Dwi Mitra Surya yang berlokasi di Menganti, Gresik. *Fly ash* diuji di Laboratorium Sentra Mineral dan Material Maju FMIPA Universitas Negeri Malang dengan dilakukannya uji tes XRF (*X-Ray Fluorescence*).

Uji XRF dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui prosentase dan unsur-unsur apa saja yang terkandung dalam *fly ash* yang digunakan untuk penelitian ini. Karena diharapkan unsur-unsur yang terkandung dalam *fly ash* adalah kapur (CaO), alumina (Al₂O₃), dan Silika (SiO₂) karena unsur-unsur tersebut merupakan unsur yang terkandung dalam semen. Berikut merupakan hasil uji XRF (*X-Ray Fluorescence*) *fly ash*.

Tabel 5 Tabel Hasil Pengujian XRF *Fly Ash*

Compound	Conc Unit (%)	Compound	Conc Unit (%)
Al	4.60	Ni	0.02
Si	13.10	Cu	0.68
S	0.40	Sr	0.80
K	0.97	Mo	1.00
Ca	24.00	In	0.07
Ti	0.92	Ba	0.71
V	0.05	Eu	0.40
Cr	0.10	Yb	0.10
Mn	0.76	Hg	0.54
Fe	51.17		

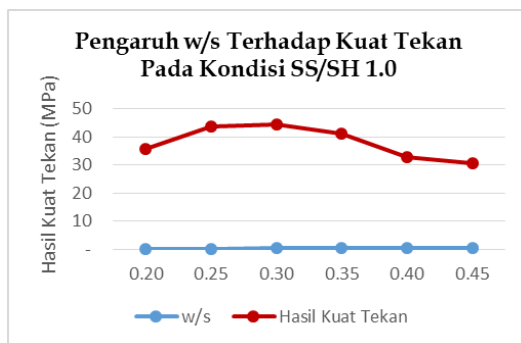
(Sumber: Uji XRF Laboratorium Sentral FMIPA Universitas Negeri Malang)

B. Hubungan w/s (*Water Solid Ratio*) dengan Kuat Tekan

Uji vicat dilakukan untuk mengetahui waktu ikat awal dan waktu ikat akhir pasta *geopolymer*.

Tabel 6 Hasil Kuat Tekan Pada Kondisi SS/SH 1.0

w/s	Hasil Kuat Tekan (MPa)
0.20	35.74
0.25	43.68
0.30	44.35
0.35	41.05
0.40	32.63
0.45	30.18



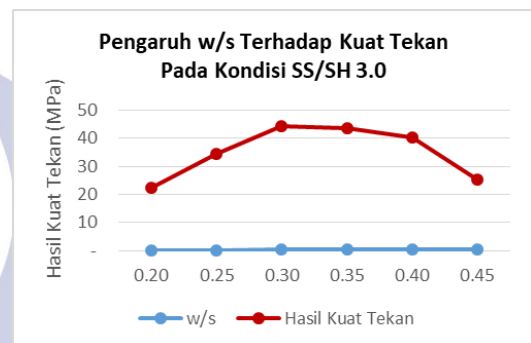
Gambar 2 Grafik Hubungan *Water Solid Ratio* Dengan Kuat Tekan Pada Kondisi SS/SH 1.0

Dari data yang terdapat pada Tabel 6 dan Gambar 2 yang merupakan hubungan *water solid ratio* dengan kuat tekan pada kondisi perbandingan SS/SH 1.0 didapat bahwa hasil kuat tekan mortar *geopolymer* berbahan dasar abu terbang ini berada di puncak kuat tekan tertinggi pada kondisi w/s 0.30 yaitu sebesar 44.35 MPa. Pada awal mula pengujian kuat tekan dengan variasi w/s 0.20 didapat hasil yang tidak terlalu besar yaitu sebesar 35.74 MPa dan kemudian mulai naik seiring bertambahnya variasi yang digunakan hingga mencapai titik puncak pada w/s 0.30. Selain itu, nilai hasil kuat tekan yang tinggi juga didapat pada variasi w/s 0.25 sebesar 43.68 MPa dan 0.35 sebesar 41.05 MPa hingga kemudian turun pada kondisi variasi w/s 0.40 sebesar 32.63 MPa dan 0.45 sebesar 30.18 MPa. Dari hasil tersebut maka dapat ditarik kesimpulan bahwa kuat tekan maksimum mortar *geopolymer* pada kondisi SS/SH 1.0 adalah saat menggunakan variasi w/s 0.30 dimana meningkatnya jumlah air dalam campuran dan molaritas aktivator mempengaruhi jumlah pori yang terbentuk. Selain itu semakin pekat aktivator yang digunakan, semakin sulit beton dicetak sehingga semakin banyak pori yang terbentuk (Januarti, 20007). Dimana jumlah pori merupakan salah satu faktor

yang sangat mempengaruhi kuat tekan. Maka, hasil kuat tekan yang didapat berada pada tengah-tengah variasi w/s yang memiliki porsi yang pas tidak kurang dan tidak lebih yaitu 0.30.

Tabel 7 Hasil Kuat Tekan Pada Kondisi SS/SH 3.0

w/s	Hasil Kuat Tekan (MPa)
0.20	22.37
0.25	34.48
0.30	44.19
0.35	43.47
0.40	40.49
0.45	25.16



Gambar 3 Grafik Hubungan *Water Solid Ratio* Dengan Kuat Tekan Pada Kondisi SS/SH 3.0

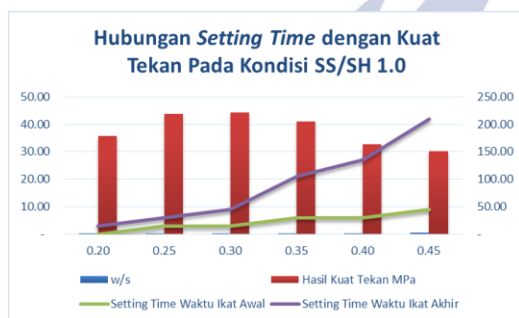
Dari data yang terdapat pada Tabel 7 dan Gambar 3 yang merupakan hubungan *water solid ratio* dengan kuat tekan pada kondisi perbandingan SS/SH 3.0 didapat bahwa hasil kuat tekan mortar *geopolymer* berbahan dasar abu terbang ini berada di puncak kuat tekan tertinggi pada kondisi w/s 0.30 yaitu sebesar 44.19 MPa. Pada awal mula pengujian kuat tekan dengan variasi w/s 0.20 didapat hasil yang tidak terlalu besar yaitu sebesar 22.37 MPa dan kemudian mulai naik pada variasi w/s 0.25 sebesar 34.48 MPa seiring bertambahnya variasi yang digunakan hingga mencapai titik puncak pada w/s 0.30. Selain itu, nilai hasil kuat tekan yang tinggi juga didapat pada variasi w/s 0.35 sebesar 43.47 MPa dan 0.40 sebesar 40.49 MPa hingga kemudian turun pada kondisi variasi w/s 0.45 sebesar 25.16 MPa. Dari hasil tersebut maka dapat ditarik kesimpulan bahwa kuat tekan maksimum mortar *geopolymer* pada kondisi SS/SH 3.0 adalah saat menggunakan variasi w/s 0.30 dimana meningkatnya jumlah air dalam campuran dan molaritas aktivator mempengaruhi jumlah pori yang terbentuk. Selain itu semakin pekat aktivator yang digunakan, semakin sulit beton dicetak sehingga semakin banyak pori yang terbentuk (Januarti, 20007). Dimana jumlah pori merupakan salah satu faktor yang sangat mempengaruhi kuat tekan. Maka, hasil kuat tekan

yang didapat berada pada tengah-tengah variasi w/s yang memiliki porsi yang pas tidak kurang dan tidak lebih yaitu 0.30.

C. Hubungan *Setting Time* dengan Kuat Tekan

Tabel 8 Hubungan *Setting Time* dengan Kuat Tekan Pada Kondisi SS/SH 1.0

w/s	Hasil Kuat Tekan (MPa)	Setting Time (Menit)	
		Waktu Ikat Awal	Waktu Ikat Akhir
0.20	35.74	0	15
0.25	43.68	15	30
0.30	44.35	15	45
0.35	41.05	30	105
0.40	32.63	30	135
0.45	30.18	45	210



Gambar 4 Hubungan *Setting Time* Dengan Kuat Tekan Pada Kondisi SS/SH 1.0

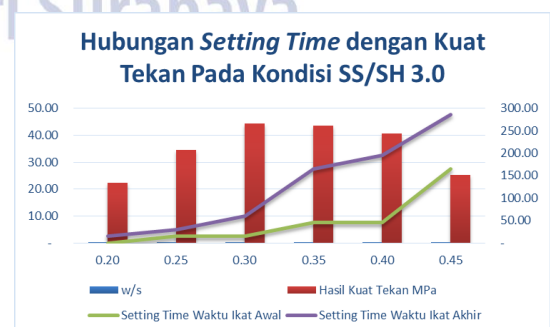
Dari data yang terdapat pada Tabel 8 dan Gambar 6 yang merupakan hubungan *setting time* dengan kuat tekan pada kondisi SS/SH 1.0 dapat diketahui bahwa proses pengikatan tercepat adalah pada kondisi variasi w/s 0.20 dengan waktu pengikatan tidak sampai 15 menit. Kemudian tingkat kecepatan semakin besar variasi w/s semakin lama pula waktu pengikatannya. Waktu pengikatan yang dibutuhkan pada variasi w/s 0.25 dengan waktu ikat awal 15 menit dan waktu ikat akhir pada menit ke 30, selanjutnya pada variasi w/s 0.30 dengan waktu ikat awal 15 menit dan waktu ikat akhir pada menit ke 45. Setelah itu proses pengikatan berjalan semakin lama pula pada kondisi variasi w/s 0.35, 0.40, dan 0.45 yang masing-masing memiliki waktu ikat awal 30 menit dan waktu ikat akhir pada menit ke 105 untuk w/s 0.35, kemudian waktu ikat awal 30 menit dan waktu ikat akhir pada menit ke 135 untuk w/s 0.40, serta waktu ikat awal 45 menit dan waktu ikat akhir pada menit ke 210 untuk w/s 0.45.

Dapat disimpulkan bahwa waktu pengikatan tercepat adalah pada kondisi variasi w/s 0.20 dan pengikatan terlama pada kondisi variasi w/s 0.45 dimana dapat diketahui bahwa faktor keenceran/kepekatan atau bisa dikatakan bahwa

pengaruh air yang digunakan pada saat proses pembuatan larutan sangat mempengaruhi *setting time* yang dibutuhkan. Dapat ditarik kesimpulan pula bahwa semakin lama waktu pengikatan maka semakin cepat dan semakin lama waktu *setting time* yang dibutuhkan maka semakin kecil pula hasil kuat tekannya karena pada waktu *setting time* yang cepat mortar *geopolymer* mengandung penambahan air yang sedikit sehingga mudah rapuh dan ketika waktu *setting time* lama mortar *geopolymer* mengandung penambahan air yang banyak sehingga menghasilkan pori dan udara didalam mortar *geopolymer* yang dibuat. Meningkatnya jumlah air dalam campuran dan molaritas aktifator mempengaruhi jumlah pori yang terbentuk. Selain itu semakin pekat aktivator yang digunakan, semakin sulit beton dicetak sehingga semakin banyak pori yang terbentuk (Januarti, 2007). Semakin tinggi perbandingan massa larutan Sodium Silikat dan Sodium Hidroksida maka semakin lama waktu pengikatan awal berlangsung, tetapi semakin cepat waktu pengikatan berakhir (Januarti, 2007). Penambahan air dan molaritas larutan aktivator pada beton *geopolymer* ini hanya sedikit berpengaruh pada initial setting time. Semakin besar kadar air yang ditambahkan, maka semakin lama *finish setting time* (Januarti, 2007).

Tabel 9 Hubungan *Setting Time* dengan Kuat Tekan Pada Kondisi SS/SH 3.0

w/s	Hasil Kuat Tekan MPa	Setting Time (Menit)	
		Waktu Ikat Awal	Waktu Ikat Akhir
0.20	22.37	0	15
0.25	34.48	15	30
0.30	44.19	15	60
0.35	43.47	45	165
0.40	40.49	45	195
0.45	25.16	165	285



Gambar 5 Hubungan *Setting Time* Dengan Kuat Tekan Pada Kondisi SS/SH 3.0

Dari data yang terdapat pada Tabel 9 dan Gambar 5 yang merupakan hubungan *setting time* dengan kuat tekan pada kondisi SS/SH 3.0 dapat

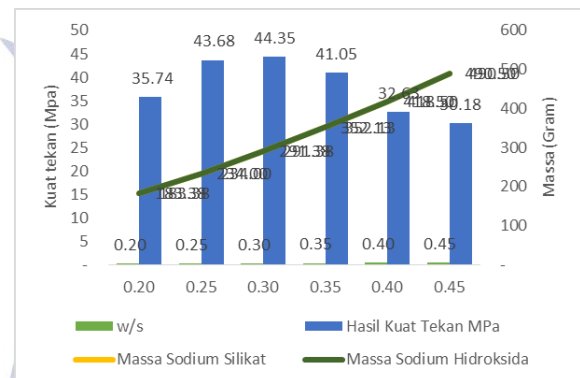
diketahui bahwa proses pengikatan tercepat adalah pada kondisi variasi w/s 0.20 dengan waktu pengikatan tidak sampai 15 menit. Kemudian tingkat kecepatan semakin besar variasi w/s semakin lama pula waktu pengikatannya. Waktu pengikatan yang dibutuhkan pada variasi w/s 0.25 dengan waktu ikat awal 15 menit dan waktu ikat akhir pada menit ke 30, selanjutnya pada variasi w/s 0.30 dengan waktu ikat awal 15 menit dan waktu ikat akhir pada menit ke 60. Setelah itu proses pengikatan berjalan semakin lama pula pada kondisi variasi w/s 0.35, 0.40, dan 0.45 yang masing-masing memiliki waktu ikat awal 45 menit dan waktu ikat akhir pada menit ke 165 untuk w/s 0.35, kemudian waktu ikat awal 45 menit dan waktu ikat akhir pada menit ke 195 untuk w/s 0.40, serta waktu ikat awal 165 menit dan waktu ikat akhir pada menit ke 285 untuk w/s 0.45.

Dapat disimpulkan bahwa waktu pengikatan tercepat adalah pada kondisi variasi w/s 0.20 dan pengikatan terlama pada kondisi variasi w/s 0.45 dimana dapat diketahui bahwa faktor keenceran/kepekatan atau bisa dikatakan bahwa pengaruh air yang digunakan pada saat proses pembuatan larutan sangat mempengaruhi *setting time* yang dibutuhkan. Dapat ditarik kesimpulan pula bahwa semakin lama waktu pengikatan maka semakin cepat dan semakin lama waktu *setting time* yang dibutuhkan maka semakin kecil pula hasil kuat tekannya karena pada waktu *setting time* yang cepat mortar *geopolymer* mengandung penambahan air yang sedikit sehingga mudah rapuh dan ketika waktu *setting time* lama mortar *geopolymer* mengandung penambahan air yang banyak sehingga menghasilkan pori dan udara didalam mortar *geopolymer* yang dibuat. Meningkatnya jumlah air dalam campuran dan molaritas aktifator mempengaruhi jumlah pori yang terbentuk. Selain itu semakin pekat aktivator yang digunakan, semakin sulit beton dicetak sehingga semakin banyak pori yang terbentuk (Januarti, 2007). Semakin tinggi perbandingan massa larutan Sodium Silikat dan Sodium Hidroksida maka semakin lama waktu pengikatan awal berlangsung, tetapi semakin cepat waktu pengikatan berakhir (Januarti, 2007). Penambahan air dan molaritas larutan aktivator pada beton *geopolymer* ini hanya sedikit berpengaruh pada initial setting time. Semakin besar kadar air yang ditambahkan, maka semakin lama *finish setting time* (Januarti, 2007).

D. Hubungan Massa Na_2SiO_3 (Sodium Silikat) dan NaOH (Sodium Hidroksida) dengan Kuat Tekan

Tabel 10 Hubungan Massa Aktivator dengan Kuat Tekan Pada Kondisi SS/SH 1.0

w/s	Hasil Kuat Tekan (MPa)	Massa (Gram)	
		Sodium Silikat	Sodium Hidroksida
0.20	35.74	183.38	183.38
0.25	43.68	234.00	234.00
0.30	44.35	291.38	291.38
0.35	41.05	352.13	352.13
0.40	32.63	418.50	418.50
0.45	30.18	490.50	490.50



Gambar 6 Hubungan Massa Aktivator Dengan Kuat Tekan Pada Kondisi SS/SH 1.0

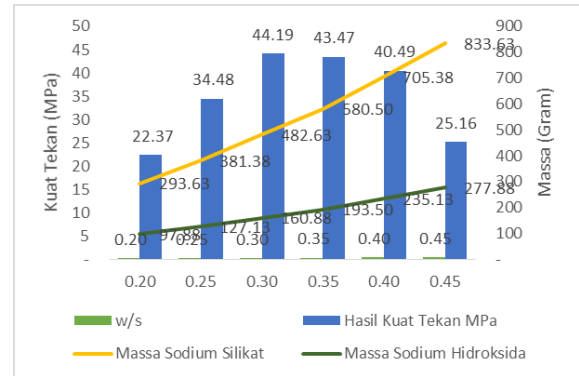
Dari data yang terdapat pada Tabel 10 dan Gambar 6 yang merupakan hubungan massa aktivator dengan kuat tekan pada kondisi SS/SH 1.0 dapat diketahui bahwa pada kondisi ini kuat tekan tertinggi berada pada variasi w/s dimana perbandingan aktivator yang digunakan tidak terlalu banyak dan tidak terlalu sedikit pula. Pada kondisi SS/SH 1.0 ini mortar yang menggunakan massa aktivator yang sedikit akan menghasilkan kuat tekan yang kecil dan mortar yang menggunakan massa aktivator yang banyak akan menghasilkan kuat tekan yang kecil pula. Dapat dilihat pada Tabel 4.25 bahwa pada kondisi variasi w/s 0.20 perbandingan massa sodium silikat dan sodium hidroksida adalah 183.38 gram dan 183.38 gram menghasilkan kuat tekan sebesar 35.74 MPa, kemudian pada kondisi variasi w/s 0.25 perbandingan massa sodium silikat dan sodium hidroksida adalah 234 gram dan 234 gram menghasilkan kenaikan kuat tekan yaitu sebesar 43.68 MPa, pada kondisi variasi w/s 0.30 perbandingan massa sodium silikat dan sodium hidroksida adalah 291.38 gram dan 291.38 gram dimana pada kondisi ini menghasilkan kuat tekan maksimal untuk kondisi SS/SH 1.0 yaitu sebesar 44.35 MPa, selanjutnya pada variasi w/s 0.35 dengan perbandingan massa sodium silikat dan

sodium hidroksida sebesar 352.13 gram dan 352.13 gram menghasilkan penurunan kuat tekan yaitu sebesar 41.05 MPa, penurunan tersebut terjadi pula pada variasi w/s 0.40 yang menggunakan perbandingan massa sodium silikat dan sodium hidroksida sebesar 418.50 gram dan 418.50 gram yang menghasilkan kuat tekan sebesar 32.63 MPa, serta pada kondisi variasi w/s 0.45 yang menggunakan perbandingan massa sodium silikat dan sodium hidroksida sebesar 490.50 gram dan 490.50 gram yang menghasilkan kuat tekan sebesar 30.18 MPa.

Dapat ditarik kesimpulan bahwa kepekatan aktivator yangat mempengaruhi kuat tekan yang dihasilkan. Mortar yang menggunakan aktivator yang sedikit akan menghasilkan kuat tekan yang kecil, mortar yang menggunakan aktivator dengan jumlah banyak akan menghasilkan kuat tekan yang kecil pula. Untuk mencapai kuat tekan maksimal maka dibutuhkan perbandingan massa aktivator yang tidak terlalu bayak dan tidak terlalu sedikit pula seperti pada variasi w/s 0.30. Secara keseluruhan semakin tinngi perbandingan aktivator menghasilkan porositas tertutup yang semakin tinggi. Dan sebaliknya pada porositas terbuka dengan nilai tinggi didapat kuat tekan rendah (Triwulan, 2007). Semakin tinggi perbandingan massa larutan Sodium Silikat dan Sodium Hidroksida tidak selalu menghasilkan kuat tekan dan kuat tarik belah yang tinggi pula (Januarti, 2007). Diduga bahwa perkembangan kuat tekan benda uji *Geopolymer* dipengaruhi oleh komponen Si dan Al pada *Fly ash* (Diaz-Loya, dkk, 2011, Rowles & O'Connor, 2003, Steveson & Sagoe-Crentsil, 2005). Meski konsentrasi Si dan Al menjadi faktor penting dalam reaksi *geopolymer*, masih ada komponen lain yang mempengaruhi perkembangan kuat tekan *geopolymer* yaitu tingginya prosentase partikel halus dan tingginya kandungan CaO.

Tabel 11 Hubungan Massa Aktivator dengan Kuat Tekan Pada Kondisi SS/SH 3.0

w/s	Hasil Kuat Tekan	Massa (Gram)	
	MPa	Sodium Silikat	Sodium Hidroksida
0.20	22.37	293.63	97.88
0.25	34.48	381.38	127.13
0.30	44.19	482.63	160.88
0.35	43.47	580.50	193.50
0.40	40.49	705.38	235.13
0.45	25.16	833.63	277.88



Gambar 7 Hubungan Massa Aktivator Dengan Kuat Tekan Pada Kondisi SS/SH 3.0

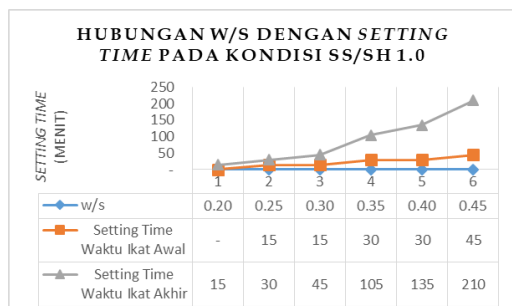
Dari data yang terdapat pada Tabel 11 dan Gambar 7 yang merupakan hubungan massa aktivator dengan kuat tekan pada kondisi SS/SH 3.0 dapat diketahui bahwa pada kondisi ini kuat tekan tertinggi berada pada variasi w/s dimana perbandingan aktivator yang digunakan tidak terlalu banyak dan tidak terlalu sedikit pula. Pada kondisi SS/SH 3.0 ini mortar yang menggunakan massa aktivator yang sedikit akan menghasilkan kuat tekan yang kecil dan mortar yang menggunakan massa aktivator yang banyak akan menghasilkan kuat tekan yang kecil pula. Dapat dilihat pada Tabel 4.26 bahwa pada kondisi variasi w/s 0.20 perbandingan massa sodium silikat dan sodium hidroksida adalah 293.63 gram gram dan 97.88 gram gram menghasilkan kuat tekan sebesar 22.37 MPa, kemudian pada kondisi variasi w/s 0.25 perbandingan massa sodium silikat dan sodium hidroksida adalah 381.38 gram gram dan 127.13 gram gram menghasilkan kenaikan kuat tekan yaitu sebesar 34.48 MPa, pada kondisi variasi w/s 0.30 perbandingan massa sodium silikat dan sodium hidroksida adalah 482.63 gram dan 160.88 gram dimana pada kondisi ini mengasilkan kuat tekan maksimal untuk kondisi SS/SH 3.0 yaitu sebesar 44.19 MPa, selanjutnya pada variasi w/s 0.35 dengan perbandingan massa sodium silikat dan sodium hidroksida sebesar 580.50 gram dan 193.50 gram menghasilkan penurunan kuat tekan yaitu sebesar 43.47 MPa, penurunan tersebut terjadi pula pada variasi w/s 0.40 yang menggunakan perbandingan massa sodium silikat dan sodium hidroksida sebesar 705.38 gram dan 235.13 gram yang menghasilkan kuat tekan sebesar 40.49 MPa, serta pada kondisi variasi w/s 0.45 yang menggunakan perbandingan massa sodium silikat dan sodium hidroksida sebesar 833.63 gram dan 277.88 gram yang menghasilkan kuat tekan sebesar 25.16 MPa.

Dapat ditarik kesimpulan bahwa kepekatan aktivator yangat mempengaruhi kuat tekan yang dihasilkan. Mortar yang menggunakan aktivator yang sedikit akan menghasilkan kuat tekan yang kecil, mortar yang menggunakan aktivator dengan jumlah banyak akan menghasilkan kuat tekan yang kecil pula. Untuk mencapai kuat tekan maksimal maka dibutuhkan perbandingan massa aktivator yang tidak terlalu bayak dan tidak terlalu sedikit pula seperti pada variasi w/s 0.30. Secara keseluruhan semakin tinngi perbandingan aktivator menghasilkan porositas tertutup yang semakin tinggi. Dan sebaliknya pada porositas terbuka dengan nilai tinggi didapat kuat tekan rendah (Triwulan, 2007). Semakin tinggi perbandingan massa larutan SodiumSilikat dan Sodium Hidroksida tidak selalu menghasilkan kuat tekan dan kuat tarik belah yang tinggi pula (Januarti, 2007). Diduga bahwa perkembangan kuat tekan benda uji *Geopolymer* dipengaruhi oleh komponen Si dan Al pada *Fly ash* (Diaz-Loya, dkk, 2011, Rowles & O'Connor, 2003, Steveson & Sagoe-Crentsil, 2005). Meski konsentrasi Si dan Al menjadi faktor penting dalam reaksi *Geopolymer*, masih ada komponen lain yang mempengaruhi perkembangan kuat tekan *Geopolymer* yaitu tingginya prosentase partikel halus dan tingginya kandungan CaO.

E. Hubungan w/s (*Water Solid Ratio*) dengan Setting Time

Tabel 12 Hubungan w/s dengan *Setting Time* Pada Kondisi SS/SH 1.0

w/s	<i>Setting Time</i> (Menit)	
	Waktu Ikut Awal	Waktu Ikut Akhir
0.20	-	15
0.25	15	30
0.30	15	45
0.35	30	105
0.40	30	135
0.45	45	210



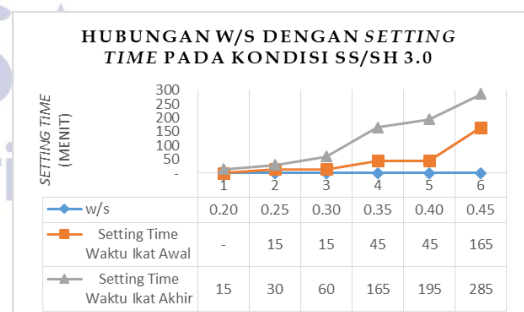
Gambar 8 Hubungan w/s Dengan *Setting Time* Pada Kondisi SS/SH 1.0

Dari data yang terdapat pada Tabel 12 dan Gambar 8 yang merupakan hubungan massa aktivator dengan kuat tekan pada kondisi SS/SH 1.0 dapat diketahui bahwa pada variasi w/s 0.20 memiliki waktu pengikatan 15 menit, selanjutnya pada variasi w/s 0.25 mengalami peningkatan lama waktu hingga pada variasi w/s 0.45, lama waktu yang dibutuhkan pada variasi w/s 0.25 yaitu waktu ikat awal 15 menit dan waktu ikat akhir pada menit ke 30, pada variasi w/s 0.30 mengalami waktu ikat awal 15 menit dan waktu ikat akhir pada menit ke 45, pada variasi w/s 0.35 mengalami waktu ikat awal 30 menit dan waktu ikat akhir pada menit ke 105, pada variasi w/s 0.40 mengalami waktu ikat awal 30 menit dan waktu ikat akhir pada menit ke 135, pada variasi w/s 0.45 mengalami waktu ikat awal 45 menit dan waktu ikat akhir pada menit ke 210.

Dapat ditarik kesimpulan bahwa semakin banyak kandungan air yang digunakan pada pembuatan mortar *geopolymer* maka akan semakin lama waktu pengikatan yang dibutuhkan. Semakin besar kadar air yang ditambahkan, maka semakin lama *finish setting time* (Januarti, 2007).

Tabel 13 Hubungan w/s dengan *Setting Time* Pada Kondisi SS/SH 3.0

w/s	<i>Setting Time</i> (Menit)	
	Waktu Ikut Awal	Waktu Ikut Akhir
0.20	-	15
0.25	15	30
0.30	15	60
0.35	45	165
0.40	45	195
0.45	165	285



Gambar 9 Hubungan w/s Dengan *Setting Time* Pada Kondisi SS/SH 3.0

Dari data yang terdapat pada Tabel 13 dan Gambar 9 yang merupakan hubungan massa aktivator dengan kuat tekan pada kondisi SS/SH 3.0 dapat diketahui bahwa pada variasi w/s 0.20 memiliki waktu pengikatan 15 menit, selanjutnya pada variasi w/s 0.25 mengalami peningkatan lama waktu hingga pada variasi w/s 0.45, lama waktu yang dibutuhkan pada variasi w/s 0.25 yaitu waktu

ikat awal 15 menit dan waktu ikat akhir pada menit ke 30, pada variasi w/s 0.30 mengalami waktu ikat awal 15 menit dan waktu ikat akhir pada menit ke 60, pada variasi w/s 0.35 mengalami waktu ikat awal 45 menit dan waktu ikat akhir pada menit ke 165, pada variasi w/s 0.40 mengalami waktu ikat awal 45 menit dan waktu ikat akhir pada menit ke 195, pada variasi w/s 0.45 mengalami waktu ikat awal 165 menit dan waktu ikat akhir pada menit ke 285.

Dapat ditarik kesimpulan bahwa semakin banyak kandungan air yang digunakan pada pembuatan mortar *geopolymer* maka akan semakin lama waktu pengikatan yang dibutuhkan. Semakin besar kadar air yang ditambahkan, maka semakin lama *finish setting time* (Januarti, 2007).

SIMPULAN DAN SARAN

A. Simpulan

Dari hasil penelitian dan pembahasan dapat diperoleh kesimpulan antara lain sebagai berikut:

1. Hasil kuat tekan optimum pada kondisi SS/SH 1.0 terdapat pada variasi w/s 0.30 Waktu pengikatan tercepat pada mortar *geopolymer* dengan NaOH 10 Molar terdapat pada variasi w/s 0.20 dan waktu pengikatan terlama terdapat pada variasi w/s 0.45.
2. Kepekatan aktivator sangat mempengaruhi kuat tekan yang dihasilkan. Waktu pengikatan yang dibutuhkan untuk variasi w/s 0.20 lebih cepat karena memiliki kandungan kadar air yang sedikit, sangat berbeda dengan variasi w/s 0.45 yang membutuhkan waktu pengikatan yang sangat lama. Dapat disimpulkan bahwa semakin banyak kandungan air maka akan semakin lama waktu ikatnya. Kandungan kimia dalam *fly ash* merupakan faktor yang sangat penting untuk pembuatan mortar *geopolymer*. Penggunaan *fly ash* yang sama namun memiliki kandungan yang sedikit berbeda juga mempengaruhi efek kuat tekan yang dihasilkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Atmajalinus, Bernardus. 2017. *Pengaruh Perbandingan Water Solid Ratio (W/S) terhadap Kuat Tekan dan Kuat Lekat Mortar Geopolymer Berbahan Dasar Abu Terbang dengan NaOH 12 Molar pada Suhu Ruang*. Surabaya: Universitas Negeri Surabaya.
- Sumajouw, Marthin D. J. Et al. 2014. *Kuat Tekan Beton Geopolymer Berbahan Dasar Abu Terbang (Fly Ash)*. Manado: Universitas Sam Ratulung
- Triwulan, et al. 2007. *Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Dengan Molaritas 8 Mol 1,5 Dan 12 Mol 1,5 Tahan Terhadap Agresifitas Air Laut Selat Madura*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Januarti, et al. 2007. *Sifat Mekanik Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Jawa Power Paiton Sebagai Material Alternatif*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Januarti, et al. 2007. *Analisa Sifat Mekanik Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Dan Lumpur Porong Kering Sebagai Pengisi*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Anwardah. 2017. *Perbedaan Air Suling (Aquadest) dan Air Deionisasi*. [https://sainskimia.com/perbedaan-air-suling-aquadest-dan-air-deionisasi/]. [6 Maret 2018].
- Apsari, Debi. 2017. *Pengaruh Penambahan Variasi Molaritas NaOH Terhadap Kuat Tekan dan Kuat Lekat Mortar Geopolymer Berbahan Dasar Abu Terbang Pada Aplikasi Spesi Bata Merah*. Surabaya: Universitas Negeri Surabaya.
- Chandra, Wahyu. 2016. *Walhi: Ekosistem Karst Indonesia Terancam Industri Semen*. [http://www.mongabay.co.id /2016 /01/18/walhi-eksosistem-karst-indonesia-terancam-industri-semen/]. [4 Maret 2018].
- Davidovits, Joseph. 1999. *Chemistry of Geopolymer System Terminology, Geopolymer '99 International Conferences France*.
- Ekaputri, et al. 2007. *Sifat Mekanik Beton Geopolymer Berbahan Dasar Fly ash Jawa Power Paiton Sebagai Material Alternatif*. Jurnal PONDASI vol 13 No.2.
- Faiza. 2015. *Beda Aquades dengan Air Mineral*. [http://faizaashop.blogspot.com/2015/07/beda-aquades-dengan-air-mineral.html]. [6 Maret 2018].
- Fitriani, Dian Rahma. 2010. *Pengaruh Modulus Alkali dan Kadar Aktifator Terhadap Kuat Tekan Fly ash-Based Geopolymer Mortar*. Surakarta: Universitas Sebelas Maret.
- Hardjito. 2004. *On the Development of Fly ash-Based Geopolymer Concrete*. Perth: Research Report GC Faculty of Engineering Curtin University of Technology.
- Hardjito et al. 2005. *Development and Properties of Low Calcium Fly ash – Based Geopolymer Concrete*. Perth: Research Report GC1 Faculty of Engineering Curtin University of Technology.

- Nugraha, Paul. 2007. *Teknologi Beton: Dari Material, Pembuatan, ke Beton Kinerja Tinggi*. Yogyakarta: Andi.
- Peraturan Beton Bertulang Indonesia. 1971. *PBBI 1971 N.I.-2*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- Rangan, et al. 2005. *Development and Properties of Low-Calcium Fly ash-Based Geopolymer Concrete*. Perth: Research Report GC1 Faculty of Engineering Curtin University of Technology.
- Rangan, B.V. 2008. *Fly ash-Based Geopolymer Concrete*. Perth: Research Report GC4 Faculty of Engineering Curtin University of Technology.
- Rangan, B.V. 2014. *Geopolymer Concrete for Environmental Protection*. India: The Indian Concrete Journal April 2014.
- Salwatul, Novi. 2017. *Pengaruh Rasio Sodium Hidroksida dengan Sodium Silikat Pada Mortar Geopolymer Berbahan Dasar Abu Terbang Terhadap Kuat Tekan dan Kuat Geser Pada Aplikasi Spesi Batu Bata*. Surabaya: Universitas Negeri Surabaya.
- SKSNI T15-1991. 1993. *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- SNI 03-1974-1990. 1990. *Metode Pengujian Kuat Tekan Beton*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 03-2834-2000. 2000. *Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 03-6825-2002. 2002. *Metode Pengujian Kuat Tekan Mortar Semen*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 03-6882-2014. 2000. *Spesifikasi Mortar Untuk Pasangan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Sugiyono. 2009. *Metode Penelitian Kuantitatif Kualitatif dan R&D*. Bandung: Alfabeta.
- Sutikno, 2003. *Panduan Praktek Beton*. Surabaya: Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Universitas Negeri Surabaya.
- Tjokrodinuljo, K. 2007. *Teknologi Beton*. Yogyakarta: KMTS FT UGM.
- Wardhono, Arie, David W. Law, dan Thomas C.K. Molyneaux. 2012. *“Strength of Alkali Activated Slag and Fly ash-based Geopolymer Mortar”*. Japan: Japan Concrete Institute.
- Zulkafli, Ramadhan. 2014. *Tinjauan Sifat Fisik dan Mekanik Pada Beton Geopolymer Tanpa Pasir Dengan Penambahan Variasi Superplasticizer*. Depok: Politeknik Negeri Jakarta.